

METROLOGIA PRIMÁRIA DE VIBRAÇÃO POR LASER: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE BALANCEIO NA EXACTIDÃO DAS MEDIDAS DE ACELERAÇÃO

Cabral, Alexandre; Godinho, M. Isabel; Oliveira, Vitor; Rebordão, José M.; Nunes, Mário C.

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
Estrada do Paço do Lumiar, 1649 – 038 Lisboa, PORTUGAL

RESUMO

Na calibração primária de vibração por laser, o efeito de balanceio do movimento é um aspecto crítico e sistemático a considerar quando se pretende efectuar medidas de elevada exactidão. A compreensão do impacto deste efeito no desempenho de medições de amplitude de aceleração é fundamental para a definição e a aproximação que se deverá efectuar.

Neste trabalho são apresentados resultados de estudos efectuados na determinação da influência introduzida por dois modelos de excitadores, *Bruel & Kjaer*, na determinação da amplitude de aceleração para um valor nominal de 100 m.s^{-2} e para uma gama de frequência entre 1 e 9 kHz, considerando uma excitação sinusoidal. Utilizou-se um sistema interferométrico baseado em detecção heterodina, apropriado para regimes de elevadas frequências.

Efectuaram-se medições considerando vários pontos de incidência do feixe laser na superfície de referência do acelerómetro-padrão, o que possibilitou uma caracterização do efeito de balanceio e avaliação da respectiva componente a considerar no balanço de incerteza expandida associado.

ABSTRACT

In the primary calibration of vibration by laser, the rocking motion effect is a critical issue to be considered in high accuracy measurements. The knowledge of the impact of this effect in the performances of acceleration amplitude measurement is fundamental for the definition of the selected calibration approach.

In this work we present results of studies on the determination of the influence in the determination of the amplitude of acceleration for two shaker models, *Bruel & Kjaer*.

The study comprises a nominal acceleration value of 100 m.s^{-2} for a frequency range between 1 and 9 kHz, considering a sinusoidal excitement. An interferometric system based in heterodyne detection was used, in order to handle the required high frequency regime.

Measurements were done, considering several points of incidence of the laser beam in the reference surface of the standard accelerometer, allowing the characterisation of the rocking motion effect and the estimation of the corresponding component in the expanded uncertainty budget.

1. Introdução

A medição de vibrações tornou-se primordial no dia-a-dia da sociedade, nos mais diversos contextos, nomeadamente, na segurança, controlo de processos, qualidade de vida, condições de trabalho e em sistemas de detecção precoce de avarias. Na indústria automóvel, são os sensores de vibração que desencadeiam os “airbags” e que controlam o momento exacto da ignição de um motor ou da injeção do combustível. O nível de vibração permitido, provocado por explosões na construção civil é permanentemente monitorizado através de sismógrafos utilizando acelerómetros triaxiais. As condições e os níveis de vibração verificados nos assentos de condutores profissionais (autocarros, desportivos ou veículos pesados) são aspectos relevantes no projecto, concepção e desenvolvimento destes acessórios.

As vibrações são medidas através de sensores de aceleração, baseados em princípios físicos. A sua calibração é essencial e a existência de padrões primários assegura a rastreabilidade da medição neste domínio.

Em Portugal, a metrologia das vibrações tem sido assegurada pelo INETI: ensaios de vibração desde 1976; calibração primária de acelerómetros desde 1998.

No âmbito de um projecto financiado pela FCT, foram atingidos objectivos muito significativos com o desenvolvimento de tecnologias por interferometria laser para a calibração absoluta de acelerómetros-padrão, abrangendo a gama de frequência 10 Hz – 10 kHz, e aceleração entre $0,5 \text{ ms}^{-2}$ to 400 ms^{-2} .

Foram até ao momento implementados dois sistemas metrologicos, um baseado em detecção homodina [1, 2] apropriado para regimes de baixa frequência ($\leq 1 \text{ kHz}$) e o outro baseado em detecção heterodina [3 a 7] para valores de frequência até 9 kHz.

Neste contexto, foi possível participar em comparações interlaboratoriais, na gama até 1 kHz: uma comparação-chave EUROMET em Junho 2004, coordenada pelo PTB (NMI Alemão), e uma comparação bilateral com o INMETRO (NMI Brasileiro), em Maio 2004, tendo-se obtido uma excelente concordância com os valores de referência validando assim o método desenvolvido. Em Agosto 2006, o INETI participou numa outra comparação-chave EUROMET, assumindo-se claramente como parte integrante neste domínio a nível primário, aguardando a publicação de CMC's (Capacidades de Medição e Calibração) na base de dados do BIPM no âmbito do MRA (Acordo de Reconhecimento Mútuo).

A participação nas comparações interlaboratoriais foi fundamental para a definição do passo seguinte, indicando claramente como prioridade a

caracterização do efeito de balanceio do movimento e a avaliação da sua relevância na estimativa do balanço de melhor incerteza.

2. Calibração de acelerómetros por interferometria óptica

A calibração de acelerómetros com base em interferometria óptica consiste no cálculo da aceleração a partir da medição do deslocamento, considerando um movimento alternativo com amplitude sinusoidal.

Dado que o valor da amplitude do deslocamento varia inversamente com o quadrado da frequência, para valores superiores a 1 kHz, este atinge valores inferiores ao do comprimento de onda da radiação laser utilizada ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$). Para viabilizar a calibração para frequências superiores a 1 kHz, implementou-se um sistema baseado em detecção heterodina. O método desenvolvido permitiu medir variações de deslocamento inferiores a um centésimo do comprimento de onda da radiação.

O valor correspondente a estas variações é obtido através da medição da diferença de fase entre um sinal de referência e o sinal proveniente do interferómetro, constituído por um espelho fixo e o acelerómetro a calibrar. Os dois sinais detectados têm uma componente AC com frequência heterodina e uma diferença de fase proporcional ao deslocamento.

2.1 Interferometria relativa com detecção heterodina

Num interferómetro heterodino é introduzida uma diferença de frequência entre os dois feixes que percorrem os dois ramos do interferómetro. O campo eléctrico dos dois feixes pode ser representado por:

$$E_i(t) = A_i \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_i \cdot t + \varphi_i) \quad (1)$$

sendo i o índice do feixe, A a amplitude, ν a frequência e φ a fase.

Quando estas duas ondas interferem, a intensidade detectada num detector ideal será dada por:

$$I(t) = [(E_1(t) + E_2(t))]^2 \quad (2)$$

O resultado desta interferência contém termos que correspondem às frequências: $2\nu_1$, $2\nu_2$, $\nu_1 + \nu_2$ e $\nu_1 - \nu_2$. Uma vez que um detector real apenas consegue detectar a componente correspondente ao menor valor $\nu_1 - \nu_2$, os termos correspondentes a frequências mais elevadas são filtrados, obtendo-se, como resultado da equação (2):

$$I(t) \propto I_0 \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (3)$$

Deste modo, o sinal detectado contém uma componente AC com frequência $\nu_1 - \nu_2$, designada por heterodina, e fase $\varphi_1 - \varphi_2$. Esta diferença de fase entre os dois feixes que interferem pode ser obtida através da medição da fase do sinal detectado relativamente

à fase de um sinal de referência composto apenas pelas duas frequências geradas.

Na figura 1 representa-se o interferómetro heterodino implementado. A diferença de frequência é obtida através de dois moduladores acusto-ópticos e a separação das frequências, nos respectivos ramos, é obtida por manipulação da polarização.

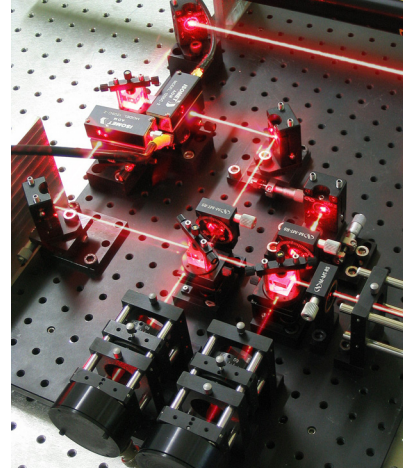
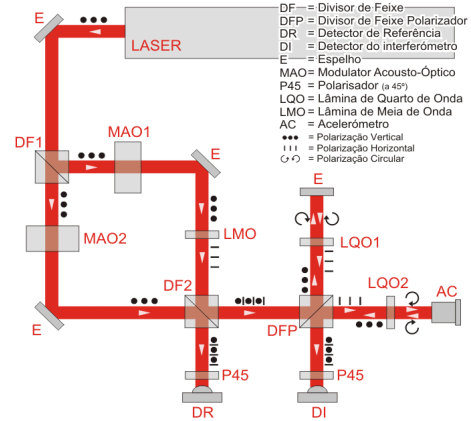


Figura 1 – Interferómetro heterodino.

Quando o acelerómetro se desloca no ramo de medição, a fase do sinal no detector do interferómetro (DI) varia em correspondência, enquanto que no de referência (DR) se mantém constante. Medindo a diferença de fase entre o sinal de referência e o sinal do interferómetro, é possível obter o deslocamento relativo através do conhecimento do comprimento de onda da radiação laser λ , uma vez que a cada ciclo de fase (2π) corresponde meio comprimento de onda:

$$d = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (4)$$

onde $\Delta\varphi$ é a diferença de fase entre os dois sinais obtidos.

2.2 Determinação da aceleração

Em primeira aproximação (linear) o movimento do acelerómetro a calibrar pode ser descrito pela seguinte equação:

$$d_{\text{Acelerómetro}} = d_{\text{Amplitude}} \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (5)$$

sendo $d_{Amplitude}$ a amplitude do movimento e f a frequência do mesmo. A partir da determinação da amplitude do deslocamento e da frequência, o cálculo da aceleração é efectuado com base em:

$$a = d_{Amplitude} \cdot (2\pi \cdot f)^2 \quad (6)$$

A partir das equações (4) e (6), obtém-se a aceleração em função do comprimento de onda da radiação no ar, da fase e da frequência:

$$a = \lambda \cdot \Delta\varphi_{Amplitude} \cdot \pi \cdot f^2 \quad (7)$$

2.3 Efeito de balanceio

A determinação da aceleração a partir da equação (7) considera que o acelerómetro efectua um movimento sinusoidal uniaxial (ao longo do eixo de oscilação). Na realidade, o movimento gerado pelo excitador contém também componentes perpendiculares ao eixo do movimento, introduzindo assim um efeito de balanceio (Figura 2). De modo a compensar este efeito, efectuam-se medições da aceleração em diferentes pontos da superfície do acelerómetro (tipicamente em quatro pontos no bordo, igualmente espaçados) e toma-se como valor a média das medições. Normalmente, este efeito cresce com a frequência de oscilação e, a partir de determinados valores, a sua influência no resultado final pode tornar-se relevante.

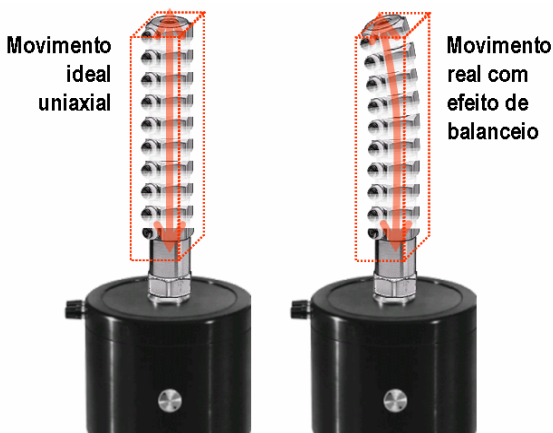


Figura 2 – Efeito de balanceio.

3. Sistema experimental

O sistema experimental implementado, controlado por computador via interface IEEE, apresentado na Figura 3, é constituído essencialmente pelos seguintes blocos: excitador de movimento sinusoidal, sistema interferométrico e sistema de aquisição e processamento de dados.

A determinação da amplitude do deslocamento é efectuada através da análise do sinal obtido pelo interferómetro. Apesar da utilização de um sistema activo de desacoplamento das vibrações exteriores, existem sempre vibrações parasitas. Como exemplo, refira-se que, quando todo o sistema está ligado, embora sem sinal de excitação aplicado ao

acelerómetro, o ruído de vibração chega a atingir valores de amplitude da ordem de 50 nm, sendo extremamente elevado quando comparado, por exemplo, com a amplitude de 50 nm, resultante de uma aceleração de 100 ms^{-2} a uma frequência de 7 kHz. De modo a filtrar o mais possível o ruído, após a determinação da variação de fase é feita uma filtragem de *Fourier* em frequência. Assim, é possível aumentar a relação sinal/ruído de modo a permitir a medição de amplitudes de algumas dezenas de nanómetro.

O processamento de dados compreende essencialmente as seguintes fases:

- Cálculo da variação de fase, utilizando “*phase unwrapping*” para remoção da ambiguidade do sinal;
- Filtragem passa-banda (centrada no valor da frequência);
- Determinação da amplitude do deslocamento de cada meio ciclo;
- Cálculo da aceleração em cada meio ciclo a partir dos valores de deslocamento obtidos.

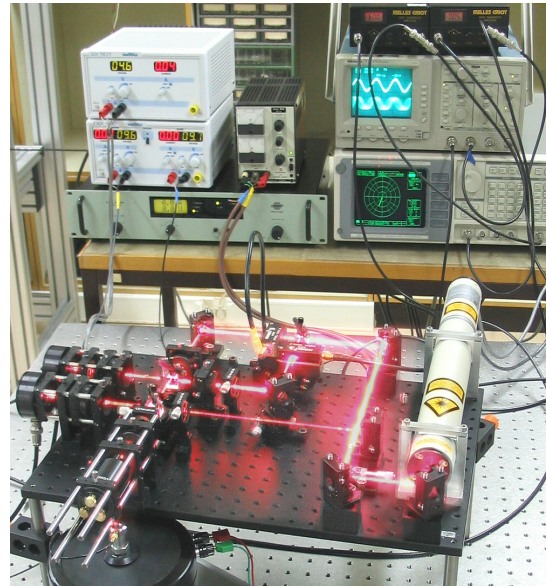


Figura 3 – Sistema experimental.

Neste trabalho foram utilizados dois excitadores de movimento, da *Brüel & Kjær*, modelos 4812 e 4809 (apresentados na Figura 4), respectivamente, com as seguintes características:

- 4812

- gama de frequência: até 5 kHz
- aceleração máxima = 685 ms^{-2}
- deslocamento máximo = 12,7 mm

- 4809

- gama de frequência: 10 Hz – 20 kHz
- aceleração máxima = 736 ms^{-2}
- deslocamento máximo = 8 mm

Foi ainda utilizado um peso morto espelhado, (Figura 5) acoplado ao acelerómetro, permitindo uma maior exactidão no ponto de incidência do feixe laser, tal como numa configuração do tipo *back to back*

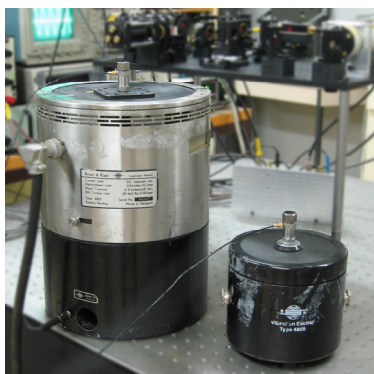


Figura 4 – Excitador *Bruel & Kjaer*, modelos 4812 (esquerda) e 4809 (direita).

4. Caracterização experimental do efeito de balanceio

De modo a caracterizar o efeito de balanceio, efectuaram-se medições a 100 ms^{-2} para as frequências de 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 5 kHz, 7 kHz e 9 kHz, incidindo o feixe em 12 pontos (igualmente espaçados) situados no bordo da superfície espelhada do peso morto colocado no topo do acelerómetro (Figura 5).

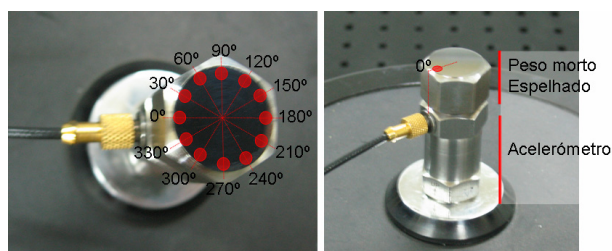


Figura 5 – Acelerómetro com o peso morto espelhado, com a indicação dos pontos de incidência.

O primeiro teste realizado pretendeu caracterizar a variação da aceleração medida ao longo dos pontos indicados na Figura 5. Os resultados foram obtidos após um período de estabilização superior a uma hora. Como é mostrado na Figura 6, os resultados obtidos para todas as frequências e para ambos os excitadores mostram que a aceleração medida varia sinusoidalmente com a posição angular no acelerómetro (a linha a cheio corresponde ao ajuste dos dados a um seno), donde se conclui que o efeito de balanceio se traduz num movimento basculante (Figura 2). Verificou-se também que a orientação do eixo de inclinação varia com a frequência e com as condições de funcionamento (período de estabilização, temperatura, etc).

A amplitude da variação da aceleração causada pelo efeito de balanceio cresce com a frequência, à excepção do excitador 4812 a 3 kHz e do excitador 4809 a 5 kHz. Nestes casos verifica-se um comportamento anormal, não só em termos de uma maior amplitude como no valor médio, considerando os resultados a outras frequências (curva tracejada na Figura 6 direita). Se no caso do excitador 4812 a 3 kHz a diferença não é muito significativa, para o

4809 a 5 kHz é bastante relevante e reveladora de uma perturbação deste excitador a esta frequência. No caso do excitador 4812, para a frequência mais elevada de 9 kHz, verifica-se também que o valor médio da aceleração é inferior ao esperado, tendo em conta os dados a outras frequências e os resultados do outro excitador, mas isto deve-se apenas ao facto de estarmos fora da especificação deste excitador ($< 5 \text{ kHz}$).

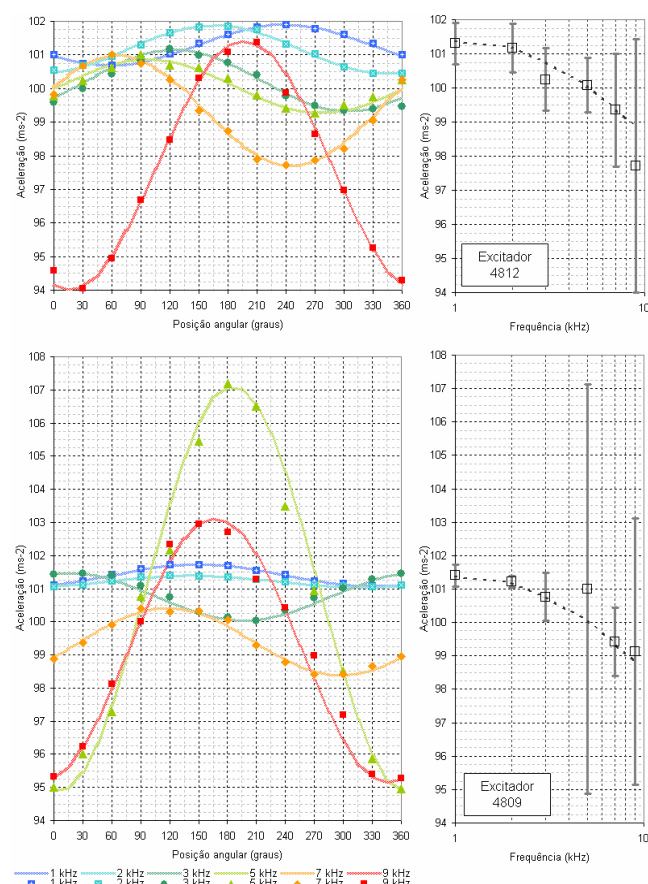


Figura 6 – Variação da aceleração ao longo da superfície (esquerda) e amplitude de aceleração causada pelo efeito de balanceio para diferentes frequências de excitação (direita), para os excitadores 4812 (cima) e 4809 (baixo).

A estabilidade da orientação do eixo de inclinação é um parâmetro crítico na determinação e compensação do efeito de balanceio. Se, por um lado, a compensação feita através da média de medições realizadas em pontos igualmente espaçados permite determinar o valor da aceleração média sentida pelo acelerómetro, por outro, se durante as medições a orientação do eixo variar, irá introduzir-se um erro no resultado final. Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos para medições efectuadas no tempo, a partir do instante em que o sistema foi ligado (apenas o laser foi previamente estabilizado).

Verificou-se que, ao fim de 1 hora, a velocidade angular do eixo estabiliza entre cerca de $-0,1$ e $0,1$ graus/minuto, à excepção do excitador 4809 a 5 kHz, posição onde tinha sido identificada um comportamento anormal em termos de amplitude de

aceleração. Neste caso, só ao fim de cerca de 6 horas atingimos o mesmo nível de estabilidade.

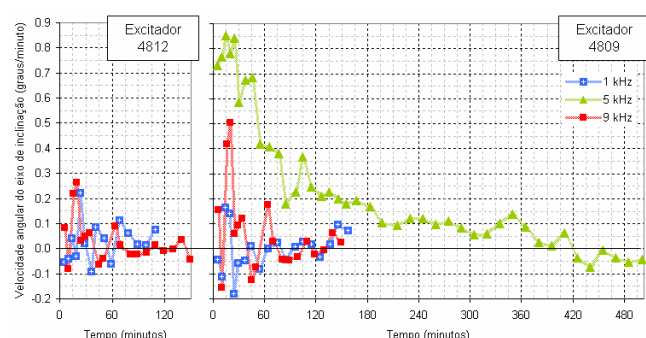


Figura 7 – Variação da velocidade angular do eixo de inclinação do movimento causado pelo efeito de balanceio em função do tempo de estabilização, para os excitadores 4812 (esquerda) e 4809 (direita).

Tanto as variações da amplitude da aceleração como a da orientação do eixo de inclinação deverão ser tidos em conta aquando da determinação da incerteza associada ao efeito de balanceio. Se por um lado a medição num elevado número de ângulos permite uma melhor caracterização da variação da amplitude de balanceio da aceleração, por outro irá implicar uma maior duração nas medições e a consequente maior variação da orientação do eixo de inclinação.

A Tabela 1 resume os valores obtidos para a aceleração e os correspondentes valores de deslocamento medido.

Tabela 1. Sumário dos resultados de aceleração e deslocamento para os excitadores 4812 e 4809.

Excitador 4812				
Freq. (kHz)	aceleração		deslocamento	
	média (ms ⁻²)	amplitude balanceio (ms ⁻²)	média (nm)	amplitude balanceio (nm)
1	101.3	0.6	2 566	15.5
2	101.2	0.7	641	4.6
3	100.3	0.9	282	2.6
5	100.1	0.8	101	0.8
7	99.4	1.7	51	0.9
9	97.7	3.7	31	1.2

Excitador 4809				
Freq. (kHz)	aceleração		deslocamento	
	média (ms ⁻²)	amplitude balanceio (ms ⁻²)	média (nm)	amplitude balanceio (nm)
1	101.4	0.3	2 569	8.4
2	101.2	0.2	641	1.1
3	100.8	0.7	284	2.0
5	101.0	6.1	102	6.2
7	99.4	1.0	51	0.5
9	99.1	4.0	31	1.2

5. O Balanço de Incertezas

A determinação da aceleração a partir das medições da amplitude da fase é feita através da equação (4). Deste modo, a determinação do valor da incerteza expandida tem em consideração as seguintes componentes:

- incerteza devida ao comprimento de onda no ar da radiação laser utilizada (tipo B/Rectangular);
- incerteza na determinação da frequência de excitação (tipo B/Rectangular);
- desvio-padrão experimental da média das medições da fase (tipo A(Normal));
- incerteza correspondente à determinação da diferença de fase (tipo B/Rectangular).

A componente da incerteza devida ao comprimento de onda no ar da radiação laser utilizada é calculada considerando a estabilidade em frequência do laser e a influência da temperatura ambiente, pressão atmosférica e humidade relativa na variação do índice de refração do ar (a partir da equação de Edlén para o índice de refração do ar [8]). No nosso caso, apesar da estabilidade do laser ser inferior a 10^{-8} , de modo a poder aceitar uma gama alargada de valores das condições ambientais, determinou-se para esta componente um valor de incerteza igual a $1,6 \times 10^{-4}$.

Para a componente de incerteza relativa à frequência de excitação foi considerado como majorante o valor de 0,1 Hz.

No caso da componente da incerteza respeitante à medição da diferença de fase, para além da componente tipo A, é necessário determinar a componente tipo B. Esta componente é determinada não só pela incerteza do sistema de medição da diferença de fase, no nosso caso 1° (17,5 mrad), mas também pela incerteza resultante do processo de compensação do efeito de balanceio. Tipicamente, o valor considerado é o resultado da média da medição em diversos pontos equidistantes no bordo da superfície do acelerómetro. Dada a dificuldade em caracterizar a influência do efeito de balanceio, é usual majorar a componente tipo B tendo em conta a experiência obtida com o sistema de calibração. No nosso caso, a partir da caracterização apresentada na secção anterior, é possível definir um modelo que, a partir dos dados experimentais, determina o valor da incerteza associado ao efeito de balanceio e à sua compensação através do uso da média de medições em diferentes pontos.

5.1 Incerteza associada ao efeito de balanceio

Como foi demonstrado, no nosso sistema, a variação da aceleração em torno da superfície do acelerómetro, devido ao efeito de balanceio, é sinusoidal.

Idealmente, uma medição no centro da superfície resultaria no valor médio que se pretende obter. No entanto, não existindo uma referência, os erros na localização do centro serão sempre superiores aos erros na localização de pontos no bordo da superfície, para além do centro nem sempre estar disponível. Por outro lado, a medição em pontos no bordo da

superfície, igualmente espaçados, permite não só a determinação mais exacta do valor médio como também a caracterização do efeito de balanceio. Tipicamente, utilizam-se 4 pontos separados de 90°. Refira-se que as médias de todos os conjuntos de 4 pontos, separados de 90°, possíveis de obter com as 12 medições apresentadas na Figura 6, tiver um desvio máximo inferior a 0,1%.

Ao determinar-se o valor médio com, por exemplo, 4 pontos, torna-se necessário avaliar qual a contribuição para a incerteza devido aos erros de posicionamento dos diversos pontos de medição. O erro na localização pode ser dividido em duas componentes (Figura 8), uma radial (ρ) e outra azimutal (θ).

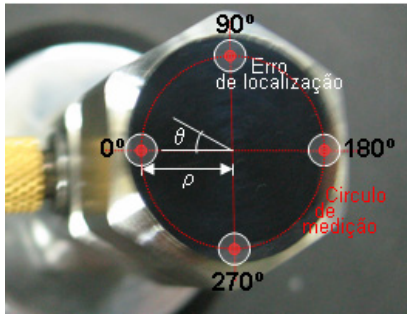


Figura 8 – Erro de localização dos pontos de medição na superfície do acelerómetro.

A maior contribuição possível da componente radial do erro de localização acontece quando todos os pontos sofrem um desvio igual da localização ideal. Neste caso, o valor médio é afectado por um erro dado por:

$$\varepsilon a_{\max_radial} = \Delta a_{balanceio} \cdot \frac{r_{\text{erro_localização}}}{R_{\text{medição}}} \quad (8)$$

em que $\Delta a_{balanceio}$ é o valor da amplitude de variação da aceleração causada pelo efeito de balanceio, $r_{\text{erro_localização}}$ é o raio do círculo do erro de localização e $R_{\text{medição}}$ é o raio do círculo de medição.

No caso da componente azimutal, para uma medição com 4 pontos, a maior contribuição possível do erro de localização acontece quando a sinusóide da amplitude da aceleração está desfasada 45° da posição angular dos pontos de medição e estes sofrem um desvio de acordo com a situação apresentada na Figura 9. Neste caso, o valor médio é afectado por um erro dado por:

$$\varepsilon a_{\max_azimutal} = \Delta a_{balanceio} \cdot \frac{\sin(45^\circ + \Delta\theta) + \sin(135^\circ + \Delta\theta) + \sin(225^\circ + \Delta\theta) + \sin(315^\circ + \Delta\theta)}{4} \quad (8)$$

em que $\Delta\theta$ é o semi-ângulo do erro de localização, dado por:

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_{\text{erro_localização}}}{R_{\text{medição}}} \right) \quad (9)$$

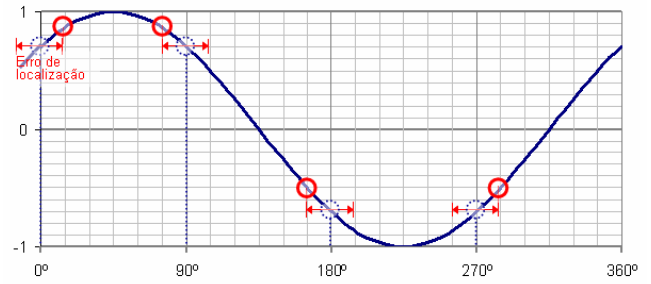


Figura 9 – Situação correspondente à maior contribuição possível do erro de localização no erro azimutal.

No nosso caso, considerou-se $r_{\text{erro_localização}} = 1 \text{ mm}$ e utilizou-se $R_{\text{medição}} = 6,5 \text{ mm}$. Deste modo, a contribuição relativa do efeito de balanceio para a incerteza, resultante da soma das componentes radial e azimutal, é dada por:

$$(15,38\%_{\text{radial}} + 10,75\%_{\text{azimutal}}) \cdot \frac{\Delta a_{\text{efeito_balanceio}}}{a_{\text{média}}} \quad (10)$$

Na Tabela 2 mostram-se os valores das duas componentes de incerteza tipo B/Rectangular da medição da fase. Tendo em conta que, para os cálculos efectuados, estas componentes correspondem sempre a mais de 70% da incerteza final, torna-se evidente a influência que o efeito de balanceio pode ter nos resultados finais.

Tabela 2. Valores das componentes de incerteza tipo B/Rectangular da medição da fase para as diferentes frequências e para os excitadores 4812 e 4809.

Excitadores 4812 e 4809		Excitador 4812	Excitador 4809
Freq. (kHz)	sistema de medição (mrad)	efeito de balanceio (mrad)	efeito de balanceio (mrad)
1	17,5	80,2	43,4
2		23,7	5,8
3		13,4	10,5
5		4,2	32,3
7		4,4	2,7
9		6,0	6,5

5.2 Balanço de Melhor Incerteza

A Tabela 3 mostra um exemplo de um balanço de incerteza para uma medição da aceleração a 2 kHz utilizando o excitador 4812.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de aceleração, e a respectiva incerteza expandida, para as frequências de 1 kHz a 9 kHz e para ambos os excitadores. A Figura 10 representa esses mesmos resultados sobre a forma de gráfico.

Tabela 3. Exemplo de um balanço de incerteza para uma medição da aceleração a 2 kHz utilizando o excitador 4812.

$$\text{Modelo matemático } a = \lambda \cdot \Delta \varphi_{\text{Amplitude}} \cdot \pi \cdot f^2$$

$a_{\text{medida}} = 101,2 \text{ m.s}^{-2}$		$f = 2 \text{ kHz}$		Excitador 4812	
Quantidade	Estimativa	Tipo de Avaliação / Distribuição	Incerteza padrão [u (x _i)]	Coefficiente sensibilidade [c _i]	Componente quadrática [c _i ² u(x _i) ²]
Desvio padrão exp. da média das medições de fase	9.4E-03 rad	A Normal	9.4E-03 rad	8.0E+00 m Hz ²	5.8E-03 m ² s ⁻⁴
Incerteza no processo de medição da fase	1.8E-02 rad	B Rectangular	1.0E-02 rad	8.0E+00 m Hz ²	6.5E-03 m ² s ⁻⁴
Incerteza na fase causada pelo efeito de balanceio	2.4E-02 rad	B Rectangular	1.4E-02 rad	8.0E+00 m Hz ²	1.2E-02 m ² s ⁻⁴
Incerteza em λ do laser	1.0E-10 m	B Rectangular	5.8E-11 m	1.6E+08 Hz ²	8.5E-05 m ² s ⁻⁴
Incerteza em f do excitador	1.0E-01 Hz	B Rectangular	5.8E-02 Hz	1.0E-01 m Hz	3.4E-05 m ² s ⁻⁴
Incerteza combinada, U _c = 0.2 ms ⁻²			Σ		2.4E-02 m ² s ⁻⁴
Factor de expansão, k = 2					
Incerteza expandida, U = 0.3 ms ⁻²					
Incerteza expandida, U = 0.3 %					

Tabela 4. Valores medidos de aceleração e respectiva incerteza expandida.

Excitador 4812			Excitador 4809	
Freq. (kHz)	Aceleração (ms ⁻²)	Incerteza expandida [k=2] (%)	Aceleração (ms ⁻²)	Incerteza expandida [k=2] (%)
1	101.3	0.3%	101.4	0.3%
2	101.2	0.3%	101.2	0.3%
3	100.2	0.8%	100.8	0.5%
5	100.1	1.1%	101.5	2.5%
7	99.3	2.1%	99.4	2.1%
9	97.7	3.7%	99.1	3.7%

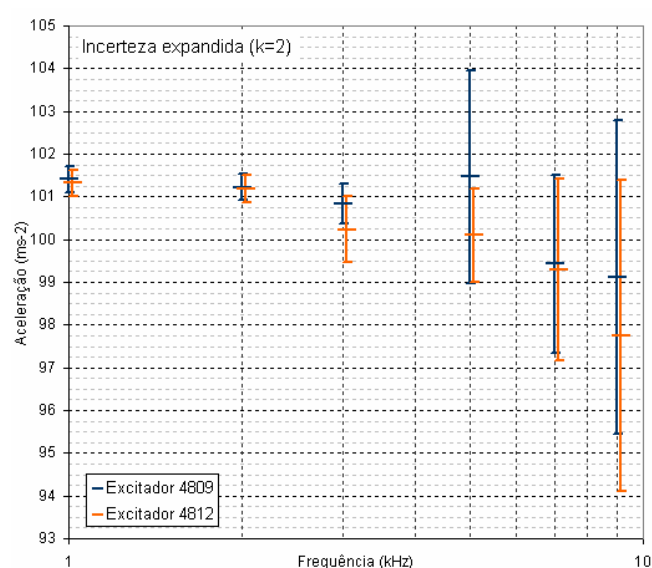


Figura 10 – Incerteza expandida para as medições de aceleração com os excitadores 4812 e 4809.

6. Conclusões

Como ficou demonstrado neste trabalho, é possível determinar a influência do efeito de balanceio no cálculo da incerteza de medição da aceleração por interferometria. A possibilidade de estimar a componente de incerteza ao invés de estimar um majorante tendo em conta a experiência obtida com o sistema de calibração evita a possibilidade de cometer um erro através de uma estimativa demasiado optimista ou de, no caso contrário, desperdiçar as capacidades metrológicas disponíveis. Uma das conclusões mais importantes deste estudo é a necessidade de caracterizar o sistema em todas as suas possíveis configurações: tipo de excitador, regime de medição (tempo de funcionamento *versus* tempo de estabilização), condições ambientais, etc. O mesmo tipo de excitador por ter características diferentes e apresentar um comportamento anormal não facilmente evidenciado sem a análise do efeito de balanceio.

A caracterização do efeito de balanceio permitiu também determinar quais os possíveis caminhos para a optimização do sistema de modo a melhorar as suas capacidades. Neste sentido, foram já definidos os próximos passos no desenvolvimento deste sistema, que contemplam a integração de um sistema controlado por computador de localização do ponto de medição e outro para alinhamento automático do interferómetro. Deste modo, será possível não só reduzir significativamente a componente associada ao efeito de balanceio como também a de a tornar muito mais expedita. Estão igualmente em análise outras configurações ópticas paralelas, em que a medida feita nos vários pontos (3, 4 ou 6) seja feita simultaneamente, ou mesmo em que a medida seja intrinsecamente bidimensional e feita na totalidade da superfície óptica do acelerómetro.

REFERÊNCIAS

- [1] Nunes, M.; Godinho, M.; Rebordão, J.; Ribeiro, L.; "Accelerometer Calibration by Laser Interferometry Using 'COTS' Components and Offline Data Processing", IMAC-XIX: Conference on Structural Dynamics, Florida – Laser Vibrometry II, Hyatt, Orlando, Florida, 734-739, February 5-8, 2001.
- [2] Godinho, M.I.A.; Cabral, A.; Nunes, M.C.; Rebordão, J.M.; Oliveira, V.; "Calibração de Acelerómetros por Interferometria Óptica – Extensão da Gama de Medição em Frequência e Aceleração", 6º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – APAET, Ponta Delgada – Açores, 27-29 Julho 2005.
- [3] Godinho, M.I.A.; Cabral, A.; Nunes, M.C.; Rebordão, J.M.; Oliveira, V.; "Calibração de Acelerómetros por Interferometria Óptica – Extensão da Gama de Medição em Frequência e Aceleração", 6º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – APAET, Ponta Delgada – Açores, 27-29 Julho 2005.

- [4] Cabral, A., Godinho, I., Oliveira, V., Rebordão, J., Nunes, M.; "Interferometria Óptica com Detecção Heterodina. Calibração Primária de Acelerómetros Padrão em regime de Alta Frequência", 1ª Conferência Nacional "Medir Mais e Melhor" organizado pela Sociedade Portuguesa de Metrologia — SPMet", com o apoio da Associação de Laboratórios Acreditados - RELACRE. Centro de Congressos do IST – Lisboa, 28 de Novembro de 2005.
- [5] Cabral, A., Godinho, I., Rebordão, J., Nunes, M., Oliveira, V., "*Metrologia por Interferometria Óptica: Acelerometria e Espaço*", Conferência "Física 2005 - Física para o século XXI" - Sociedade Portuguesa de Física, Porto - 1, 2 e 3 de Dezembro 2005.
- [6] Godinho, I., Nunes, M., Cabral, A., Rebordão, J., Oliveira, V.; "Absolute Calibration of Standard Accelerometers with Optical Interferometry" - 7th Intl Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Ancona - Italy, 19 - 22 June 2006.
- [7] Cabral, A., Rebordão, J., Oliveira, V., Godinho, I., Nunes, M., "Heterodyne Interferometry for Calibration of Standard Accelerometers in High Frequency Regime" - 7th Intl Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Ancona - Italy, 19 - 22 June 2006.
- [8] Birch, K.,; Downs M.; "An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air", Metrologia 30, 155-162, 1993.